

특 집

콘크리트의 균열

콘크리트 구조물의 균열체계에 따른 균열제어와 대책

Control of Cracking in Concrete Structures



최 완 철*

1. 머리말

콘크리트 구조물에서 균열의 발생은 피할 수 없다. 그러나 허용치를 초과할 경우 손상이라고 보며 이러한 정도의 균열이 설계, 재료, 시공상의 결함으로 인하여 시공 중이거나 사용 중에 자주 발생한다. 발생한 균열은 장기적 요인으로 더욱 심화되며 더우기 일단 손상된 콘크리트 구조물의 보수·보강은 비용 뿐만아니라 복구기간동안 사용 제한면에서 손실이 크다.

균열의 발생원인으로서 구조물에 작용되는 하중, 또는 건조수축에 의한 균열등을 들 수 있으나, 정상적인 조건에서 콘크리트가 시공되지 못함으로 발생하는 결함이 크게 문제되고 있다. 잘못 사용된 재료, 부적절한 시공법, 설계오류, 잘못된 시공습씨, 기후 변화에 대한 준비소홀 등에 의해서 결함이 생기며 이것이 콘크리트의 균열로 나타난다. 이러한 여러가지 요인으로부터 균열은 설계, 시공, 사용단계에서 임의로 발생될 수 있고(그림 1), 한편 올바른 재료, 설계, 시공, 사용으로 예상

되는 균열을 최대한 방지, 제어하여야 할 것이다.

이 글에서는 균열의 생성 메카니즘, 영향요인을 간략히 분석하고 이에 근거되어 균열의 제어 기법(crack control)을 고찰한다. 생성요인에 근거하여 균열제어 기법으로서 사용재료, 설계, 시공법을 기술하고 시공단계에서 발생하는 균열 방지에 대한 대책을 살펴본다. 균열로 인한 장기적 구조물의 영향, 즉 내구성과 관련하여 논의하여 관련성의 이해를 높이고 또한 최종 대책으로서 균열발생 후 보수 보강시의 기본적인 원칙을 들어 설명한다. 본 내용은 간략하나마 콘크리트 구조물의 총체적인 균열체계(crack tree)를 통하여 이해를 높이고 나아가 대책수립에 도움이 되고자 한다.

2. 균열의 생성 메카니즘

균열의 생성 메카니즘은 대체로 미세균열(microscopic level)로 부터 접근한다. 하중이 증가하면서 모르터와 골재 부착계면에서 미세 균열이 발생되어 발전된다. 또한, 하중이 작용되기 전에도 건조수축 과정에서 체적변화로 부터 모르터와 골재사이의 부착 균열이 발생될 수 있다(그림

* 정회원, 숭실대학교 건축공학과 부교수

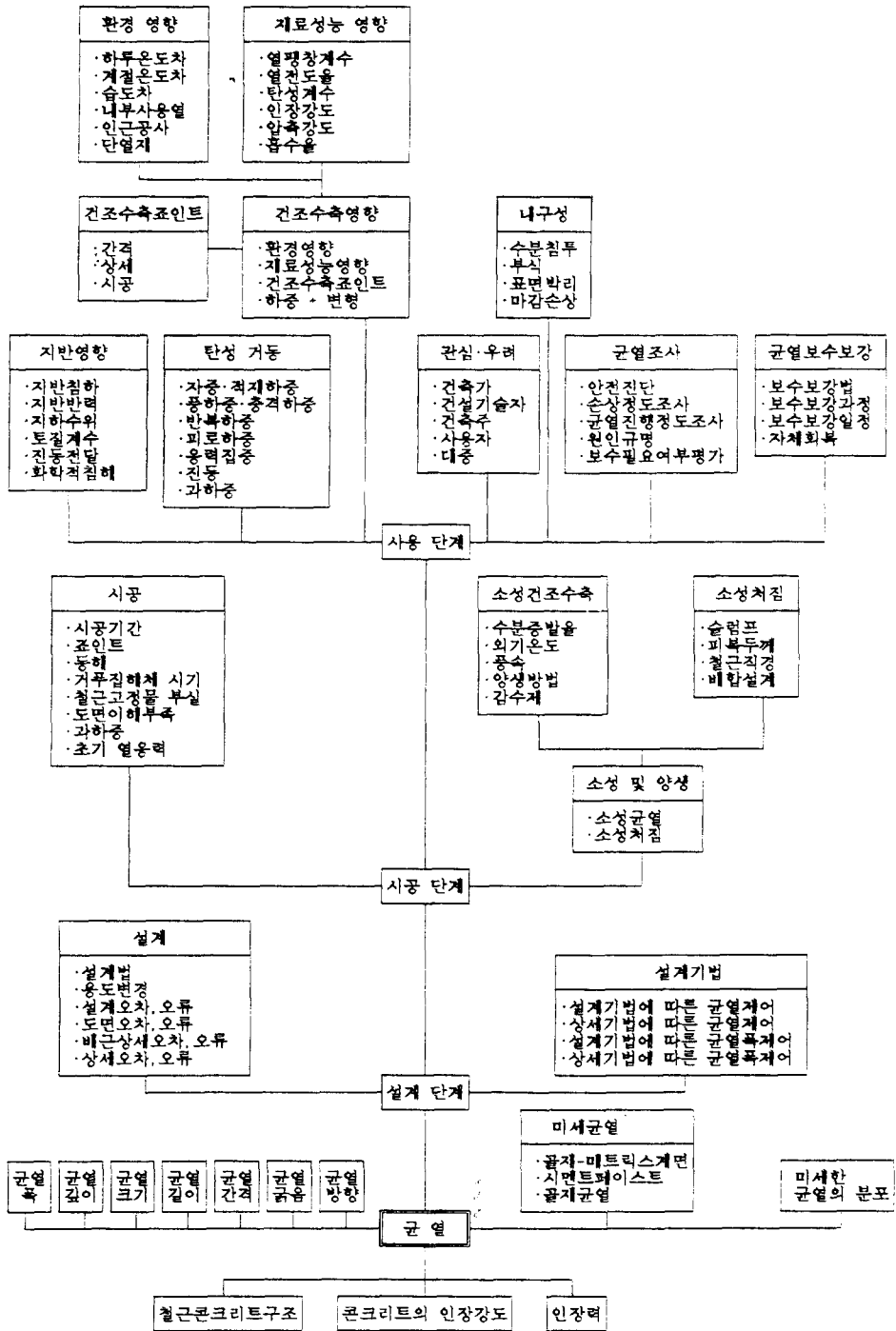


그림 1 균열 체계(M. G. Richardson, 1986)

2). 콘크리트의 비선형 성질이 이러한 부착균열의 생성으로부터 나타나며, 모르타, 특히 시멘트 페이스트가 콘크리트의 균열 및 응력-변형곡선을 결정하는 중요한 요인이 된다.

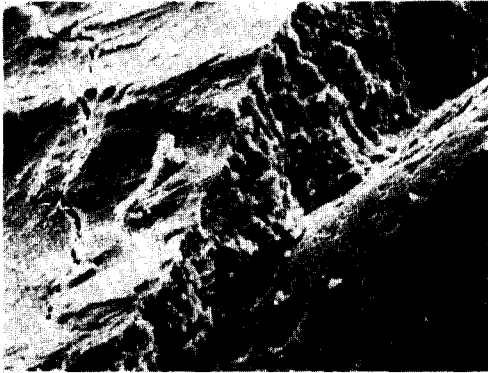


그림 2 세골재와 CSH 계면의 부착파괴(배율=160×)
(Emmanuel K. Attigboe, David Darwin, 1985)

콘크리트의 균열생성 및 발전에 대해서 또 다른 접근방법으로서 파괴균열(fracture) 이론을 적용하고 있는바 콘크리트가 복합체(composite), 비균질성(nonhomogeneous)에도 불구하고 많은 성공적인 응용 사례를 보여주고 있다. 즉, 균열의 선단(crack tip)에서 균열의 기하학적 형태와 작용되는 응력의 크기(stress intensity factor : K) 및 재료의 성능(toughness)에 따라서 내부에너지가 방출되는 기구를 통하여 전파되며, 이러한 균열의 생성, 전파 원리는 철, 또는 기타 재료에서의 현상과 동일하게 유추할 수 있다. 특히, 피로하중, 부식, 열하중 등과 관련된 균열제어 기법은 이 분야의 응용 방향을 제시하여 주고 있다.

3. 건조수축에 의한 균열의 생성 메카니즘

건조수축에 의한 균열은 가장 흔히 발생될 수 있는 콘크리트 균열로서, 설계, 시공과정에서 균열제어 기법이 특별히 필요하다. 건조수축에 의한 균열은 경화과정 뿐만 아니라 경화후에도 다른 요인 즉, 열응력, 동결작용으로부터 복합되어 발생한다. 다른 재료와 마찬가지로 콘크리트는 건조시

수축하고 습윤시 팽창한다. 즉, 콘크리트내부의 시멘트 페이스트의 함수량 정도가 콘크리트의 수축 또는 팽창의 원인이 된다. 이러한 함수량 변화에 따른 체적의 변화는 수경성 시멘트 제품의 본질적 특성이다.

시멘트에 물이 첨가되어 수화작용이 일어나고 이 결과 수산화 칼슘의 결정물질이 생성된다. 이러한 결정물질은 겔 상태(calcium silicate gel)로서 콜로이드의 미세 입자이며 비표면적이 극히 크다. 경화된 시멘트 페이스트 내부 공극에 물이 차 있고, 또한 상당량의 수분이 겔에 포함되어 있다. 수축은 주로 이러한 겔에 흡수되어 있는 수분이 손실될 때 발생한다. 건조시에 먼저 시멘트 페이스트내의 공극수가 증발되며 이로 인한 수축량은 적은 반면, 수화된 겔 결정구조 사이에 수분이 감소할때 수축량은 커진다. 콘크리트가 건조조건에 노출될 때, 수분은 내부에서 외부로 서서히 확산되고 외부 표면에서 증발된다. 불기에 쪼을 때는 이와 반대현상이 일어나며 콘크리트는 팽창하게 된다.

한편, 콘크리트 내부의 골재가 이러한 수축팽창을 구속하여 체적변화를 저감시킨다. 대체로 골재는 흡수량에 따라서 체적변화가 크지 않으며, 따라서 시멘트 페이스트의 건조수축량에 비하여 콘크리트의 건조수축량은 골재의 구속력으로부터

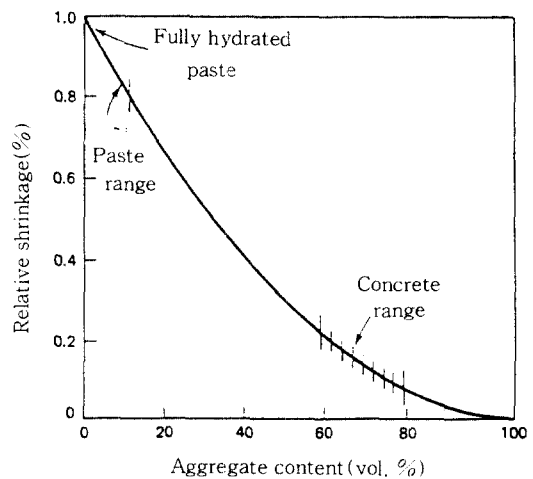


그림 3 건조수축에 대한 골재량의 영향(Sidney Mindess, Francis Young, 1981)

영향을 받아 훨씬 적어진다. 이러한 건조수축의 저감효과는 골재가 콘크리트에 사용되는 가장 큰 이유가 된다. 기존연구 결과에 의하면 이러한 골재의 구속력은 콘크리트내의 골재의 최대크기, 골재의 강성 및 사용량에 관계된다.(그림 3).

골재에 의한 구속력은 골재의 강성, 즉 골재의 종류에 따라 영향을 받게 되고 골재에 따라서 건조수축량이 달라진다. 표 1 에서 보듯이 강도가 큰 석영, 석회암, 화강암 종류가 낮은 건조수축으로 분류되고 사암, 점판암, 각섬석, 현무암 종류가 건조수축량이 큰 것으로 나타나고 있다. 특히 사암과 같이 흡수율이 큰 경우, 수축률이 높다. 일반적으로 강성이 크고 흡수율이 낮은 골재가 건조수축률이 낮다고 할 수 있다. 이상의 균열 생성 메카니즘과 요인에 근거하여 균열 제어 및 대책을 논의할 수 있겠다.

표 1 골재종류에 따른 콘크리트의 건조수축량

골재	비중	흡수율(%)	재령 1년 수축률(%)
사암	2.47	5.0	0.116
점판암	2.75	1.3	0.068
화강암	2.67	0.8	0.047
석회암	2.74	0.2	0.041
석영	2.66	0.3	0.032

4. 건조수축 균열의 제어 및 대책

콘크리트 표면은 공기에 노출되어 건조되게 마련이고 이에 따라 수축된다. 이러한 건조수축에 대한 대책으로서, 적합한 재료, 배합설계, 적절한 보강근의 배근, 시공조인트 설치, 올바른 시공법을 들 수 있으며 이들을 통하여 균열 생성을 줄일 수 있겠다.

1) 시멘트

시멘트 종류에 따라 건조수축량을 일률적으로 말하기는 쉽지 않으나 보통포틀랜드 시멘트 페이스트의 6개월 동안의 건조수축량은 0.0015~0.0060의 범위로 알려져 있다. 실험연구 결과에 의하면 C_3A/SO_3 의 비가 낮을 수록, Na_2O 또는 K_2O

의 함수량이 낮을 수록, C_4AF 함유량이 높을 수록 건조수축량이 낮은 것으로 알려지고 있다. 한편, 시멘트 분말도가 커서 시멘트 입자가 미세할 수록 콘크리트의 건조수축량이 다소 큰 것으로 관찰되고 있다.

2) 골재, 배합설계, 배합수량

골재는 클수록 구속력이 커지므로 가능한 골재 크기를 크게하고 강도가 높고 흡수율이 낮은 골재를 사용하여야 한다. 과도한 슬럼프, 과도한 공기량이 건조수축량을 증가시킬 수 있으며, 새골재 사용량을 줄여 수축량을 억제할 수 있다.

배합수량이 많을수록 건조수축량이 증가하므로 단위수량을 가능한 줄여야 한다. 연구결과, 배합수량 증가에 따라 건조수축량이 증가하는 것으로 밝혀지고 이러한 관계는 그림 4에서 보여준다. 배합수량의 증가는 구속력을 발휘할 수 있는 골재량을 줄이게 하고 결과적으로 수축량이 증가한다. 따라서, 시멘트 페이스트 내의 배합수를 가능한 줄이고 골재량을 증가시킴으로서 수축량을 감소시킬 수 있겠다.

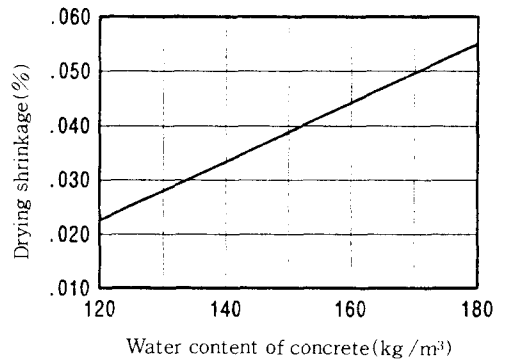


그림 4 배합수량에 따른 건조수축량의 관계 (ACI Committee 224, 1989)

배합수량과 관련되어 건조수축에 영향을 주는 또 하나의 요인이 콘크리트의 온도이다. 필요한 배합수량은 콘크리트 온도에 특히 상관 관계가 높아(그림 5), 동일한 슬럼프 조건에서 콘크리트 온도가 38℃에서 10℃로 낮아질때 수량 20kg/m³를

줄일 수 있으며 결과적으로 수량감소는 건조수축량을 상당량 줄일 수 있겠다. 고온에서 높은 슬럼프를 얻고자 배합수량을 늘리고 또한 골재사용량을 줄일 경우, 건조수축량이 커지고 따라서 콘크리트에 균열발생 가능성이 높아짐으로 특히 주의하여야 한다.

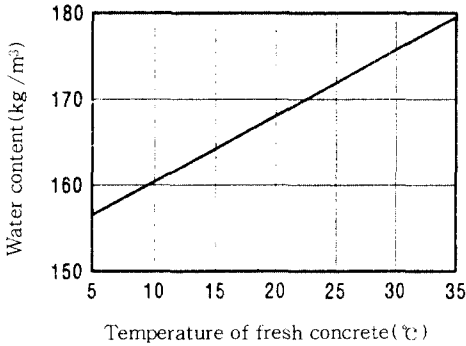


그림 5 콘크리트 온도에 따른 배합수량의 관계 (ACI Committee 224, 1989)

3) 철근배근

철근배근으로 부터 균열의 양을 줄이고 적절히 균열을 분담시킴으로서 큰 균열대신에 미세한 균열을 고르게 분포시킴으로서 안전과 사용성을 확보할 수 있게 한다. 특히, 단면이 비교적 얇은 부재의 건조수축에 대해서 철근은 효과적이다. 바닥, 슬래브, 벽체에 대한 최소 철근량 및 배근간격은 설계 규준에 제시되어 있으며 이를 필히 준수하여야 한다.

4) 조인트 설치

적절하게 조인트를 설치함으로써 눈에 거슬리게 큰 균열의 발생을 효과적으로 방지할 수 있다. 슬래브, 보도, 벽체와 같이 비교적 면이 큰 콘크리트는 스스로 균열을 일으켜 조인트를 형성하기 전에 적절하게 조인트를 주어야 한다.

5) 팽창시멘트 사용

콘크리트를 경화초기에 팽창시킴으로서 수축이

보상되어 균열을 억제할 수 있는 팽창시멘트가 개발되어 사용되고 있다. 사용량에 따라 경화초기에 0.16%까지 길이가 팽창되어 재령이 지남에 따라 건조하는 과정에서 수축되어 종국적으로 체적변화가 발생되지 않고 따라서 균열발생이 방지된다. 이러한 팽창시멘트의 효과를 활용하기 위해서는 충분한 수분 양생이 필요하며 지나친 팽창은 철근을 과도하게 늘어나게 하여 건조과정에서 균열을 발생시킴으로 이에 대한 주의가 필요하다.

그외 혼화제 사용이 건조수축에 영향을 줄 수 있다. 공기연행제 사용은 건조수축율을 다소 크게 하나, 시공연도가 증가되므로 오히려 유리할 수 있다. 감수제나 지연제 사용은 건조수축량을 감소시키나 급결제는 초기 건조수축을 상당량 증가시킴으로 주의가 필요하다. 한편 습윤 양생기간은 건조수축에 별로 영향이 없는 것으로 밝혀지고 있다. 장기간 습윤양생은 궁극적 건조 수축량에는 별로 도움이 되지 못하게 된다. 콘크리트 부재의 크기는 건조 수축율에 크게 상관되어 특히, 실험실에서 제작된 시험체 크기가 실제 구조물 크기와 다름으로 주의가 필요하다.

5. 시공단계에서 발생하는 균열의 제어 및 대책

콘크리트 타설후 수일내에 곧 나타나는 결함을 보통 건조수축 균열이라고 볼 수 있으나 실제로 건조수축 균열은 몇달이 지나야 나타나는 것으로 이때 다른 원인에서 발생되었을 수 있으므로 그에 대한 이유가 규명되어야 한다. 콘크리트 표면이 마감되기 전 또는 직후에 면에 바로 균열이 나타나는 경우, 이를 소성 수축균열이라 한다. 이는 콘크리트 내부는 아직 소성(굳지않은) 상태에 있으나, 표면이 빠르게 건조되면서 발생되기 때문이다. 이들은 보통 불연속으로 모서리까지 연결되지 않은 균열 패턴을 갖는다. 소성수축균열을 방지하기 위하여서는 타설초기에 외기(바람, 직사광선)에 직접 노출되지 않게함이 중요하여 콘크리트 표면 마감후, 즉시 덮어 줌이 필요하다. 배합설계, 공기연행제 사용을 신중하게 함으로서 피할 수 있다.

콘크리트 단면이 깊을 때, 콘크리트는 계속 침

하하게 되고 이러한 침하과정에서 장애요인이 있을 때 그 주위에 균열이 발생한다.(소성처짐균열) 이러한 장애요인으로서는 철근, 거푸집 타이철물들이 대표적이다. 거푸집면이 콘크리트 침하에 마찰저항을 일으켜 깊고 좁은 기둥주위에 간혹 균열을 발생시킨다.(그림 6). 이 경우 배합설계에 세심한 주의를 하여 공기 연행체를 사용하거나 순차적인 다짐으로 방지할 수 있다.



그림 6 콘크리트 기둥 주위의 소성처짐균열
(R. T. L Allen, 1987)

이러한 시공단계에서 발생할수 있는 균열을 제어하기 위하여 다음 각 항별로 국외의 시방서에서는 세부적으로 규정하고 있으며 균열제어를 효과적으로 하기 위한 규정이 장차 국내에서도 요망된다.

재료(시멘트, 골재, 혼화제)

배합(골재율, 최대골재크기, 슬럼프치, 온도)

운반

타설

마감

거푸집(철근고정물, 해체시기)

조인트(간격, 상세)

양생(습윤보양)

이들 각 시공과정에서 발생될 수 있는 균열 형태와 대책을 표 2에서 보여 준다.

표 2 균열형태 및 대책

균열형태	원 인	방지대책	보수방법
경화중, 경화직 후에 발생하는 수평면 균열	소성균열, 표면의 급격한 건조	타설시 보호장치, 타설직후 표면덮기, 공기연행체 사용	시멘트 풀 또는 점성이 낮은 폴리머 주입
깊은단면에서 철근, 거푸집타이 철물 주위의 균열	소성처짐, 경화중에 침하	배합설계조정, 공기연행체 사용	경화중에 재다짐, 경화후 균열주입
두터운 단면에서 냉각시 균열	수축작용이 구속된 열응력	수축에 대한 구속요인을 최소화, 강도 발현까지 냉각 지연	균열주입
표면의 공기 구멍	거푸집면에 기포밀집 다짐불량, 박리제 불량	진동개선, 배합설계 조정, 박리제 개선, 흡수성 거푸집 사용	폴리머 몰탈로 채움
벌집형(honeycomb) 기공	다짐불량, 그라우트부족	진동개선, 골재 크기 줄이기, 그라우트 손실 방지	절단후 주입
색조차이	배합, 양생, 진동, 박리제, 거푸집사이 누수	재료균질성확보, 누수방지	표면도막제
철근의 피복두께 부족	철근고정불량, 간격제불량, 상세문제	간격제 개선, 고정장치 확보, 상세에 여유치 증가	폴리머 시멘트, 표면보호제 도막

6. 내구성에 관련된 균열의 제어 및 대책

콘크리트 균열은 장기적으로 발전, 증가함으로 이러한 장기영향요인에 대한 대책이 필요하다. 사용하중에서 발생한 미세균열은 안전성에 그다지

큰 영향을 주지 않으나 거시 균열(macroscopic cracking)로서 볼때, 사용성(serviceability)에 중요한 의미를 갖게 한다. 특히, 균열로 부터 철근의 부식, 부식으로 부터 균열의 팽창, 외관손상 등 일련의 문제와 상호관계되어 고려하여야 한다.

균열은 폭은 이러한 장기적 영향과 반복하중으로 작게는 10%에서 크게는 1000%까지 수년에 걸쳐 증가하는 것으로 알려져 있다. 일정한 응력 수준에서는 균열의 폭이 크게 발전되지 않으나, 과다한 철근 배근 상태나, 반복하중하에서 균열발전속도가 빠르다.

초기하중에서 철근근처의 균열은 철근과 콘크리트 사이의 부착작용으로 발전이 억제된다. 그러나, 시간이 지남에 따라 콘크리트와 철근사이의 부착력이 파괴되고 철근 주위의 균열은 콘크리트 표면의 균열폭 만큼 커지고 이와같이 표면의 균열이 내부에 도달하는데 소요기간을 추정할 수 있다.

내구성 관련 균열의 제어대책은 콘크리트의 장기 성능저하(deterioration)를 일으키는 메카니즘에 관련된다. 이러한 콘크리트의 성능저하를 일으키는 원인 및 메카니즘은 여러해동안 광범위하게 연구되어 왔으며 최근에는 이러한 성능저하 문제를 어느정도 합리적으로 밝혀내고 있다. 성능저하 현상의 주요 메카니즘은 다음으로 나누어지며 이와 관련하여 제어 및 대책을 수립하여야겠다.

- 1) 동결융해작용
- 2) 알칼리-실리카 반응
- 3) 화학물질에 의한 콘크리트 손상
- 4) 철근의 부식

7. 콘크리트 구조물 균열의 보수 보강

보수 보강 공사 이전에, 먼저 손상의 원인을 가능한 정확히 규명하여야 한다. 이 말은 극히 당연한 듯하나 실제로 빠른 시간내에 보수를 하게 됨에 따라 늘 소홀하기 쉽다. 또는 현상이 복합적일 때 규명이 난이해 질 수 있으며 특별히 진단을 철저하여야 한다.

원인 규명이 된 후, 다음 단계는 보수의 목적을 분명히 밝혀야 한다. 보수의 목적은 다음의 몇 가

지로 구분된다.

- 내구성(Durability)
- 안전성(Structural strength)
- 기능(Function)
- 미관(Appearance)

손상된 부분의 성격에 따라 적절한 보수 보강법이 채택되어야 한다. 에폭시나 폴리머 모르터를 주입해서 보수하는 방법은 시공이 용이한 잇점이 있다. 주입 방법에서 주입의 정밀도가 문제가 될 수 있다. 철근이나 강판을 추가 보강 또는 접착하여 강도나 강성을 증가시키는 방법은 시공의 편리성으로 역시 많이 통용되고 있다. 이때 에폭시 강판 접착력이 또한 문제가 될 수 있으며 이에 근거한 설계방법이 정립되어야 한다. 특히, 국내에서 보수 보강 공사에서 사용되는 보수 보강재료가 적절한 검정기준이 없이 단순 경험에 의존하고 있는 실정이므로 이에 대한 설계기준, 시방서의 정립이 요망된다.

8. 줄임말

콘크리트 구조물에서 균열의 발생은 피할수 없다. 그러나 허용치를 초과할 경우 손상이라고 보는데, 이러한 정도의 균열이 설계, 재료, 시공상의 결함으로 인하여 시공 중이거나 사용 중에 자주 발생한다. 콘크리트의 균열은 구조물에 대한 신뢰를 떨어뜨리고, 안전과 사용상의 문제를 야기할 수 있다. 또한, 구조물의 성능저하 현상으로 균열은 더욱 진전됨으로 내구성의 문제를 일으킨다. 따라서, 이에 대한 총체적인 균열체계(crack tree)에 대한 이해와 대책이 마련되어야겠다.

이 글에서는 균열의 생성 메카니즘, 영향요인을 간략히 분석하고 이에 근거되어 균열제어 기법과 대책을 살펴보았다. 균열로 인한 장기적 구조물의 영향, 즉 내구성과 관련하여 논의하고 또한 최종 대책으로서 보수 보강시의 기본적인 원칙을 설명하였다.

콘크리트 구조물에서 균열은 자연 발생적이나, 설계와 시공 수준에 따라 손상이라 할 수 있는 정도의 균열이 흔히 발생되며 우리나라에서의 그 정

도는 더욱 심각하다. 균열체계에 대한 보다 포괄적인 이해와 연구가 이루어지고, 균열제어를 위한 세부적인 시방이 작성되어 콘크리트 구조물의 신뢰도와 안전성을 높여야겠다.

참 고 문 헌

1. 한국콘크리트학회, “최신콘크리트공학”, 1992, pp. 477-516
2. 최완철 외 5인, “에폭시 접착강판으로 보강된 철근콘크리트보의 구조적 기동에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 학술발표논문집, 1994. 5, pp. 22-29
3. ACI Committee 224, “Control of Cracking in Concrete Structures”, ACI, Detroit, 1989, 42 pp.
4. R. T. L. Allen, “Damage Occuring During Construction”, Blackie Academic & Professional, 1987, pp. 1-14
5. Emmanuel K. Attiogbe, David Darwin, “Submicroscopic Cracking of Cement Paste and Mortar in Compression” SM Report No. 16, Univ. of Kansas, Nov. 1985, 439 pp.
6. M. G. Richardson, “Cracking in Reinforced Concrete Buildings”, Concrete(Journal of the Concrete Society, U. K.), May 1986, V. 20, No. 5 pp. 21-23
7. Sidney Mindess, Francis Young, “Concrete” Prentice-Hall, 1981

전문서적 보급 안내

「최신 콘크리트 공학」

—수정판—

- 주요내용 : (1) 콘크리트 정의 및 발달사 (12) 콘크리트의 시험
 - (2) 시멘트 (13) 품질관리
 - (3) 콘크리트 골재 (14) 내구성
 - (4) 배합수 (15) 콘크리트의 균열 및 파괴역학
 - (5) 혼화재료 (16) 특수콘크리트
 - (6) 배합설계 (16.1) 고강도 콘크리트
 - (7) 굳지 않은 콘크리트의 성질 (16.2) 경량 콘크리트
 - (8) 혼합, 운반 및 타설 (16.3) 섬유보강 콘크리트
 - (9) 양생 (16.4) 콘크리트-폴리머 복합체
 - (10) 굳은 콘크리트의 강도 특성 (16.5) 중량콘크리트
 - (11) 콘크리트의 역학적 특성
- 보급가격 : 15,000원(회원은 10% 할인해 드립니다), 우편발송시 우송료 1,500원 별도 부담해야 함.
 - 구입방법 : 상기 서적이 필요하신 분은 학회사무국에서 구입하시기 바라며 직접 오시기 어려운 분은 밑에 기재된 은행계좌로 송금하시면 우송해 드립니다.(송금자명 필히 기재요망)
 - 은행계좌 : 한일은행(096-132587-01-501)(예금주 : 최신콘크리트공학)
 - 문의처 : 한국콘크리트학회 사무국
주소 : 서울시 강남구 청담동 134-20(삼익빌딩 419호)
전화 : 546-5384, 543-1916, 545-0199